植物生态学报 2016, **40** (3): 0–0
Chinese Journal of Plant Ecology
doi: 10.17521/cjpe.2015.0192
http://www.plant-ecology.com

吉林省森林植被固碳现状与速率

范春楠[1,2] 韩士杰[2] 郭忠玲[1*] 郑金萍[1] 程 岩[3]

[1]北华大学, 吉林 132013; [2]中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; [3]吉林省松花江三湖自然保护区管理局, 吉林 132013

摘 要 通过对吉林省森林植被的普遍调查、典型调查以及植被样品含碳率测定, 结合吉林省2009年和2014年森林清查数据, 估算了区域森林植被的碳储量、碳密度及固碳速率。研究结果表明: 林下植被的生物量在不同林分和同类林分中存在较大的差异, 整体不足乔木层生物量的3%, 灌木植物的生物量略高于草本植物和幼树。不同林分类型的乔木含碳率介于45.80%–52.97%之间, 整体表现为针叶林高于阔叶林; 灌木和草本植物分别为39.79%–47.25%和40%左右。吉林省森林植被碳转换系数以0.47或0.48更为准确, 若以0.50或0.45作为植被的碳转换系数计算碳储量, 会造成±5.26%的偏差。吉林省森林植被不仅维持着较高的碳库水平, 而且极具碳汇能力; 2009年和2014年碳储量分别为471.29 Tg C和505.76 Tg C, 累计碳增量34.47 Tg C, 平均每年碳增量6.89 Tg C·a^{-1}; 碳密度由64.58 t·hm^{-2}增至66.68 t·hm^{-2}, 平均增加2.10 t·hm^{-2}, 固碳速率0.92 t·hm^{-2}·a^{-1}。森林植被碳储量的增长主体是蒙古栎(*Quercus mongolica*)林和阔叶混交林, 合计碳增量占总体的90.34%。受植被发育引起的生物量增长、林分龄组晋级以及森林经营所引起的面积变化影响, 各龄组植被碳增量为幼龄林>过熟林>近熟林>中龄林, 成熟林表现为负增长; 固碳速率为过熟林>幼龄林>近熟林>中龄林>成熟林。森林植被碳储量和碳密度的市/区分布整体表现为自东向西明显的降低变化; 碳增量以东北和中东部地区较高, 西部地区较低; 固碳速率整体以南部的通化地区和白山地区相对较高, 中部的吉林地区和东部的延边地区次之, 西部的白城地区、松原地区等地呈负增长。

关键词 森林植被; 林下植被; 含碳率; 碳储量; 碳密度; 固碳速率; 分布格局

引用格式: 范春楠, 韩士杰, 郭忠玲, 郑金萍, 程岩 (2016). 吉林省森林植被固碳现状与速率. 植物生态学报, 40, 00–00. doi: 10.17521/cjpe.2015.0192

Present status and rate of carbon sequestration of forest vegetation in Jilin Province, Northeast China

FAN Chun-Nan[1,2], HAN Shi-Jie[2], GUO Zhong-Ling[1*], ZHENG Jin-Ping[1], and CHENG Yan[3]

[1]Beihua University, Jilin 132013, China; [2]Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; and [3]Administration Bureau of Sanhu Nature Reserve of Songhua River in Jilin Province, Jilin 132013, China

Abstract

Aims Forests represent the most important component of the terrestrial biological carbon pool and play an important role in the global carbon cycle. The regional scale estimation of carbon budgets of forest ecosystems, however, have high uncertainties because of the different data sources, estimation methods and so on. Our objective was to accurately estimate the carbon storage, density and sequestration rate in forest vegetation in Jilin Province of China, in order to understand the role of the carbon sink and to better manage forest ecosystems.

Methods Vegetation survey data were used to determine forest distribution, size of area and vegetation types regionally. In our study, 561 plots were investigated to build volume-biomass models; 288 plots of shrubs and herbs were harvested to calculate the biomass of understory vegetation, and samples of trees, shrubs and herbs were collected to analyze carbon content. Carbon storage, density and sequestration rate were estimated by two forest inventory data (2009 and 2014), combined with volume-biomass models, the average biomass of understory vegetation and carbon content of vegetation. Finally, the distribution patterns of carbon pools were presented using ArcGIS soft ware.

Important findings Understory vegetation biomass overall was less than 3% of the tree layer biomass, varying greatly among different forest types and even among the similar types. The carbon content of trees was between 45.80%–52.97%, and that of the coniferous forests was higher than that of the broadleaf forests. The carbon content of shrub and herb layers was about 39.79%–47.25% and 40%, respectively. Therefore, the vegetation carbon conversion coefficient was 0.47 or 0.48 in Jilin Province, and the conventional use of 0.50 or 0.45 would cause

收稿日期Received: 2015-06-02 接受日期Accepted: 2015-10-24
* 通信作者Author for correspondence (E-mail: gzl65@163.com)

deviation of ±5.26%. The vegetation carbon pool of Jilin Province was at the upper range of regional carbon pool and had higher capacity of carbon sequestration. The value in 2009 and 2014 was 471.29 Tg C and 505.76 Tg C, respectively, and the total increase was 34.47 Tg C with average annual growth of 6.89 Tg C·a^{-1}. The corresponding carbon sequestration rate was 0.92 t·hm^{-2}·a^{-1}. The carbon density rose from 64.58 t·hm^{-2} in 2009 to 66.68 t·hm^{-2} in 2014, with an average increase of 2.10 t·hm^{-2}. In addition, the carbon storage of the *Quercus mongolica* forests and broadleaved mixed forests, accounted for 90.34% of that of all forests. The carbon increment followed the order of young > over-mature > near mature > middle-aged > mature forests. The carbon sequestration rate of followed the order of over-mature > young > near mature > middle-aged > mature forests. Both the carbon increment and the carbon sequestration rate of mature forests were negative. Furthermore, spatially the carbon storage and density were higher in the east than in the west of Jilin province, while the carbon increment was higher in northeast and middle east than in the west. The carbon sequestration rate was higher in Tonghua and Baishan in the south, followed by Jinlin in the middle and Yanbian in the east, while Baicheng and Songyuan, etc. in west showed negative values.

Key words forest vegetation; understory vegetation; carbon content; carbon storage; carbon density; carbon sequestration rate; distribution pattern

Citation: Fan CN, Han SJ, Guo ZL, Zheng JP, Cheng Y (2016). Present status and rate of carbon sequestration of forest vegetation in Jilin Province, Northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology,* 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.0192

碳循环作为全球气候变化研究的核心问题之一，备受国际社会关注(Schlesinger, 1977; IPCC, 2006; Luan *et al*., 2011; Wani *et al*., 2014)。针对全球碳平衡存在的“失汇”现象，多数学者认为这是对森林生态系统缺乏足够了解所致(Tans *et al*., 1990; Keeling *et al*., 1996; 刘国华等, 2000; 王效科等, 2002)。我国气候条件复杂、森林类型多样，受区域尺度研究对象的广泛性、复杂性，以及基础数据和计算方法的不完善等因素影响，在过去的20多年中，森林植被和土壤碳储量的估算结果存在较大的差异(Dixon *et al*., 1994; Fang *et al*., 2001; 王效科等, 2001; 解宪丽等, 2004; 赵敏和周广胜, 2004)，主要原因为估算方法、参数选择等因素的差异(王绍强等, 2003; 解宪丽等, 2004; 范春楠, 2014)。

吉林省是我国重点林业省份之一，位于全球暖化敏感的中高纬度带，在我国生态环境建设、碳汇管理乃至全球碳循环的研究中占有重要的地位。然而相关区域尺度森林碳循环的研究工作和实测数据还比较缺乏(王新闯等, 2011; 范春楠, 2014)，多数研究集中于某个地点或生态系统的某个部分(唐凤德等, 2009; 郑泽梅等, 2009; Zhu *et al*., 2010; 齐麟等, 2013)。为此，本文以吉林省森林植被为研究对象，通过区域森林的普遍调查和典型调查以及林下植被的生物量收获和植被含碳率测定，结合吉林省2009年和2014年森林清查数据，利用生物量转换因子连续函数法，估算了区域森林植被的碳库状况和固碳速率。研究结果对于全面理解吉林省森林植被碳库地位，诠释我国温带森林碳收支的不确定性和全球大气中CO_2浓度持续升高等问题，以及面向碳汇功能的森林经营管理等具有重要的意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

吉林省(121.63°–131.32° E, 40.87°–46.30° N)位于我国东北地区中部，是东北亚的腹心地带。区域气候多样、地貌和土壤类型众多；多年平均气温在2–6 ℃之间；年降水量400–900 mm，自东向西呈明显的湿润、半湿润和半干旱气候。森林分布多集中于东部山区和中东部低山丘陵区。森林起源多为天然林，主要分布于长白山及张广才岭一带，针叶树种以红松(*Pinus koraiensis*)、黄花落叶松(*Larix olgensis*)、云杉(*Picea jezoensis*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)等为主；阔叶优势种为白桦(*Betula platyphylla*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、紫椴(*Tilia amurensis*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)等。人工林的面积、蓄积比重不大，树种结构简单，多为落叶松和杨树(*Populus* spp.)等，以小片纯林或防护林带广泛分布于全省境内。

1.2 研究方法

样地设置采用普遍调查和典型调查相结合的方法，既考虑样地分布的全面性、均匀性、可行性，又

依据吉林省各类林分的面积和蓄积比率, 兼顾林分类型、林龄和演替过程等。研究期间共计设置并调查了561块面积为30 m × 30 m的样地。

具体的调查方法为: 首先利用森林罗盘围取样地边界, 记录样地的地理坐标、海拔、坡向、坡度、坡位、郁闭度以及人为干扰程度, 再利用网格法将样地划分为5 m × 5 m的小样方36个, 并以每个小样方为单位进行乔木树种的每木检尺, 记录树种、胸径、树高等; 同时在样地内均匀布设面积为5 m × 5 m和1 m × 1 m的小样方各10个, 调查灌木和草本植物的种类、平均高度、株数和盖度等。

为获得不同森林群落灌木和草本植物生物量, 考虑到野外工作时间、经费等因素, 选取区域和群落类型有代表性的样地共计288块。在样地内分别均匀设置2 m × 2 m的小样方和1 m × 1 m的小样方各10个, 在常规调查的同时, 采用全收获法对灌木和草本植物进行采集, 并以每个收获样方为单位, 进行分选、烘干、称质量, 统计各样地灌木和草本植物生物量。

为尽量准确地估算森林植被碳储量, 我们还采集了不同植物的各器官样品, 用于含碳率测定。具体方法为: 乔木树种含碳率测定样品的采集选取代表性样地的优势树种, 按每树种的叶、枝、干、根4种器官分别取样; 灌木和草本植物含碳率测定样品在各样地的生物量收获样品中分取。调查期间共采集乔木树种20种, 各器官样品444个; 灌木植物根、枝、叶样品1 755个; 草本植物地上和地下样品1 170个。

1.3　数据统计

1.3.1　植被生物量

基于吉林省2009年和2014年森林清查资料的60个市/区、18个林分类型、5个龄组的面积和蓄积汇总数据(不含柳灌林和果树林), 利用生物量转换因子连续函数法换算乔木生物量。其中, 蓄积-生物量转换方程采用区域561块标准地实测数据, 以《吉林省一元立木材积表》求得各样地的林分蓄积; 生物量的统计在比较各学者建模样本数量、径级范围以及收获和测定方法等基础上, 分别选取了Wang (2006)的10个树种(包括红松、落叶松、水曲柳、胡桃楸、黄檗、紫椴、蒙古栎、槭树(*Acer* spp.)、山杨和白桦)的异速生长方程, 陈传国和朱俊凤(1989)建立的云杉、臭冷杉和榆(*Ulmus japonica*)的生物量模型, 以及贾炜玮等(2008)建立的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)异速生长方程进行求算, 进而通过线性回归构建了蓄积-生物量的转换方程, 建模过程及模型结果详见范春楠(2014)的博士论文。因转换方程的林分类型与清查数据的林分类型不完全一致, 研究对清查数据的林分进行了相应合并, 将除白桦林和蒙古栎林以外的阔叶林均使用阔叶林组参数, 臭冷杉林和云杉林划为针叶混交林。

森林清查资料中忽略了胸径5 cm以下的乔木幼树调查, 也不包含灌木和草本植物调查数据。为了补充此部分植被生物量的缺失, 研究选用范春楠等(2013)建立的14种幼树生物量模型, 根据样地实测数据求得各林分类型的幼树生物量; 灌木和草本植物生物量则为收获法测得的各类林分平均值; 区域林下植被生物量即为各林分类型幼树生物量、灌木和草本植物生物量的平均值与该林分面积的乘积。

1.3.2　植被含碳率

利用重铬酸钾-硫酸氧化湿烧法(LY/T1237-1999)测定植物样品的有机碳含量。乔木含碳率为乔木各器官生物量与含碳率乘积的加权平均值, 林分乔木含碳率为林分乔木个体生物量与含碳率乘积的加权平均值。灌木、草本含碳率分别为各样方收获样品器官生物量与含碳率乘积的加权平均值。

1.3.3　植被碳储量

植被碳储量的测算以吉林省森林清查中各市/区的各林分类型的分龄组数据为基础单元, 乘以对应的群落类型含碳率, 利用公式(1)求得:

$$S_c = \sum_{c=1}^{60}\sum_{i=1}^{18}\sum_{j=1}^{5} B_{cij} \times \overline{C_i} \times A_{cij} \qquad (1)$$

S_c为植被碳储量(Tg C), B_{cij}为某市/区、某林分类型、某龄组植被生物量, $\overline{C_i}$为各林分类型植被对应含碳率, A_{cij}为面积。

1.3.4　固碳速率

森林生态系统固碳速率为单位时间内单位面积碳储量的变化量, 单位通常为$t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, 可利用不同时期森林生态系统单位面积碳储量的变化量来估算, 见公式(2):

$$\Delta C_{Fi} = (C_{Fi,t_1} - C_{Fi,t_2}) / (t_1 - t_2) \qquad (2)$$

式中, ΔC_{Fi}为森林生态系统i的固碳速率, C_{Fi,t_1}和C_{Fi,t_2}分别为t_1、t_2时间单位面积的碳储量。

然而, 区域尺度的森林生态系统除存在多个类型和不同发育阶段外, 其面积也在不断发生着变化, 欲利用各系统类型在不同发育阶段的固碳速率, 通

doi: 10.17521/cjpe.2015.0192

过面积加权平均来获取区域生态系统固碳速率难以实现。部分学者采用区域碳储量的年增量表示固碳速率(Nowak & Crane, 2002; 甄伟等, 2014), 此法虽然可体现区域碳储量的年度变化量, 但并非单位面积的固碳速率, 无法进行不同区域间的比较。本研究尝试基于吉林省2009年和2014年两次清查数据, 将吉林省森林植被看作是一个整体系统, 通过"时间序列法", 假定固碳速率在各年度恒定, 森林面积的年际增减相等, 则不同时期森林碳储量可变化为公式(3), 平均每年固碳速率为公式(4):

$$S_{c,t_2} = S_{c,t_1} + \{(t_2-t_1) \times A_{t_1} + [1 + 2 \ldots\ldots + (t_2-t_1)] \times \Delta A\} \times C_s \quad (3)$$

$$C_s = (S_{c,t_2} - S_{c,t_1}) / \{(t_2-t_1) \times A_{t_1} + [1 + 2 \ldots\ldots + (t_2-t_1)] \times \Delta A\} \quad (4)$$

式中: C_s为区域植被平均每年固碳速率, 单位为$t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, S_{c,t_1}和S_{c,t_2}分别为2009年和2014年的碳储量, A_{t_1}为2009年的森林面积, ΔA为森林面积的年增量。

2 结果和分析

2.1 林下植被生物量与植被含碳率

通过对各调查样地林下植被生物量及植被样品含碳率的统计, 得出主要林分类型的林下植被生物量、植被含碳率及其变异情况, 结果见表1。

由表1可知, 不同林分类型的林下植被生物量差异较大, 以针阔混交林和阔叶混交林较高, 人工杨树林最低, 平均生物量介于0.04–4.45 $t \cdot hm^{-2}$之间, 除蒙古栎林(3.31%)略高外, 其余林分均不超过乔木生物量的3%。林下植被生物量的分配整体表现为灌木植物略高于草本植物和幼树。其中, 灌木生物量介于0.00–2.36 $t \cdot hm^{-2}$之间, 以蒙古栎林、阔叶混交林和针阔混交林较高, 达2 $t \cdot hm^{-2}$以上; 其次为人工黄花落叶松林、人工樟子松林和杂木林; 其余各林分不足1 $t \cdot hm^{-2}$。草本生物量介于0.04–1.34 $t \cdot hm^{-2}$, 以山杨林和针阔混交林略高; 其次为椴树林、阔叶混交林和针叶混交林; 人工杨树林最低。幼树生物量介于0.00–1.07 $t \cdot hm^{-2}$之间, 以白桦林、针阔混交林、针叶混交林和人工黄花落叶松林相对较高, 在1 $t \cdot hm^{-2}$左右; 其次为阔叶混交林、胡桃楸林和人工樟子松林; 人工杨树林的幼树缺失。

从林下植被生物量的变异系数来看, 幼树在同类林分内的变异最高, 尤其是人工黄花落叶松林、人工樟子松林、针叶混交林和蒙古栎林, 变异系数均超过了100%; 草本和灌木植物的生物量变异相对较小, 分别在50%和35%以下。

植被含碳率在不同林分类型间也表现出一定的差异。乔木含碳率介于45.80%–52.97%, 以人工红松林最高, 胡桃楸林最低, 整体表现为针叶林高于阔

表1 不同林分类型的林下植被生物量及植被含碳率
Table 1 Biomass of understory vegetation and carbon content of vegetation in different forest types

林分类型 Forest type	林下植被生物量 Biomass of understory vegetation ($t \cdot hm^{-2}$)				植被含碳率 Carbon content of vegetation (%)		
	幼树 Young tree	灌木 Shrub	草本 Herb	合计 Total	乔木 Tree	灌木 Shrub	草本 Herb
白桦林 *Betula platyphylla* forest	1.07 (56.57)	0.28 (10.71)	0.63 (34.92)	1.98 (1.27)	48.22 (0.70)	43.58 (4.92)	40.76 (5.86)
山杨林 *Populus davidiana* forest	0.52 (17.38)	0.47 (17.02)	1.34 (35.07)	2.33 (1.24)	48.45 (0.55)	47.25 (1.13)	42.16 (2.88)
胡桃楸林 *Juglans mandshurica* forest	0.66 (81.86)	0.42 (7.14)	0.22 (22.73)	1.30 (1.31)	45.80 (0.74)	42.58 (7.96)	39.24 (5.52)
椴树林 *Tilia* forest	0.31 (74.19)	0.53 (20.75)	0.99 (7.07)	1.83 (1.38)	46.77 (0.31)	45.76 (5.44)	41.51 (6.44)
蒙古栎林 *Quercus mongolica* forest	0.47 (111.79)	2.36 (32.63)	0.68 (22.06)	3.51 (3.31)	48.46 (0.41)	43.69 (4.35)	37.24 (5.34)
杂木林 Undesirable tree forest	0.25 (18.56)	1.61 (22.36)	0.70 (35.71)	2.56 (2.87)	46.36 (0.43)	39.79 (7.74)	42.66 (4.52)
阔叶混交林 Broadleaf mixed forest	0.72 (83.30)	2.26 (22.57)	0.86 (12.79)	3.84 (2.59)	47.60 (2.43)	43.02 (8.48)	37.80 (6.88)
针阔混交林 Needle broad-leaved mixed forest	0.99 (74.17)	2.20 (15.00)	1.26 (17.46)	4.45 (2.22)	49.51 (1.85)	45.44 (6.00)	40.68 (7.30)
针叶混交林 Needle mixed forest	0.96 (111.88)	0.47 (17.02)	0.80 (13.75)	2.23 (1.29)	51.08 (1.08)	45.67 (3.32)	42.62 (2.53)
黄花落叶松林 *Larix olgensis* forest	0.47 (55.42)	0.33 (24.24)	0.27 (48.15)	1.07 (0.63)	50.92 (0.62)	45.73 (4.25)	39.69 (5.04)
人工黄花落叶松林 *Larix olgensis* plantation	0.90 (139.25)	1.56 (33.97)	0.23 (21.74)	2.69 (2.57)	50.82 (0.62)	45.21 (4.17)	41.49 (5.50)
人工红松林 *Pinus koraiensis* plantation	0.22 (54.34)	0.31 (19.35)	0.56 (21.43)	1.09 (0.91)	52.97 (0.43)	44.36 (3.89)	36.15 (5.43)
人工樟子松林 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation	0.77 (114.19)	1.17 (31.62)	0.38 (49.63)	2.32 (2.95)	50.77 (0.80)	41.82 (1.57)	35.96 (11.40)
人工杨树林 *Populus* plantation	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.04 (2.81)	0.04 (0.05)	47.61 (0.41)	0.00 (0.00)	42.20 (4.14)

植被生物量和含碳率结果括号中的数值为变异系数(*CV*); 合计结果括号中的数值为林下植被生物量占乔木层生物量比例(%)。
The numbers in the brackets in the columns of vegetation biomass and carbon content are the coefficient of variation (*CV*); the numbers in the brackets in the columns of total biomass are the percentage of understory vegetation biomass out of tree layer biomass (%).

叶林。灌木植物的含碳率介于39.79%–47.25%之间, 以山杨林略高, 最低为杂木林。草本植物的含碳率相对较低, 在40%左右, 以针叶混交林、人工杨树林和白桦林相对较高, 人工红松林和人工樟子松林相对较低。

植被含碳率的变异系数以灌木和草本植物相对较大, 最高变异达11.40%, 为人工樟子松林的草本植物, 而各林分乔木植物的变异系数均不足3%。从植被的含碳率及其林分差异来看, 若单纯以0.50或0.45作为植被的碳转换系数, 定会造成碳储量估算结果的偏差。

2.2　森林植被固碳现状与速率

通过对吉林省两次清查数据(各市/区、各林分类型、分龄组蓄积和面积数据)的整理, 利用蓄积-生物量转换方程(范春楠, 2014), 结合各林分林下植被生物量和植被含碳率数据, 统计获得吉林省森林植被碳库现状与速率, 结果见表2、图1和图2。

由表2可知, 吉林省森林植被碳储量由2009年的471.29 Tg C, 增至2014年的505.76 Tg C, 5年累计增加34.47 Tg C, 平均每年碳增量6.89 Tg C·a^{-1}, 固碳速率0.92 t·hm^{-2}·a^{-1}。碳储量的增加一方面源于吉林省森林面积的增长; 另一方面则归因于植被碳密度的上升。其中, 吉林省森林面积5年累计增加28.36 × 10^4 hm^2, 累计增长了3.89%; 植被碳密度也由2009年的64.58 t·hm^{-2}增加到2014年的66.68 t·hm^{-2}, 平均增加2.10 t·hm^{-2}。若按此面积和固碳速率的增长计算, 到2020年吉林省森林植被碳储量将达到548.58 Tg C。

不同林分类型碳储量两期清查均以阔叶混交林最高, 针阔混交林和蒙古栎林次之, 三者合计分别占2009和2014年度植被碳储量的77.99%和78.86%; 再次为黄花落叶松林、针叶混交林和杨树林, 分别占各年度植被碳储量的5%左右。经相关分析发现各林分类型的碳储量与其面积呈极显著的正相关关系, 即碳储量的大小主要取决于林分的面积基数。

碳密度在各林分类型和年度间均存在较大差异。其中, 2009年的碳密度以云杉林最高, 达122.28 t·hm^{-2}; 其次为红松林、针叶混交林和臭冷杉林, 均达90 t·hm^{-2}以上。2014年的碳密度则以椴树林最高, 针叶混交林和臭冷杉林次之, 但三者的碳密度均不足90 t·hm^{-2}。

不同林分类型碳增量以蒙古栎林和阔叶混交林

表2　吉林省森林植被2009年和2014年碳储量、碳密度及其变化
Table 2　Carbon storage and carbon density of forest vegetation in 2009 and 2014 and their changes between 2009 and 2014 in Jilin Province

林分类型 Forest type	面积 Area (× 10^4 hm^2)		碳储量 Carbon storage (Tg C)			碳密度 Carbon density (t·hm^{-2})			固碳速率 Carbon sequestration rate (t·hm^{-2}·a^{-1})
	2009	2014	2009	2014	变化 Change	2009	2014	变化 Change	
阔叶混交林 Broadleaf mixed forest	351.22	353.56	240.65	253.81	13.16	68.52	71.93	3.41	0.75
蒙古栎林 *Quercus mongolica* forest	99.80	100.44	61.07	78.52	17.45	61.19	78.15	16.96	3.48
针阔混交林 Needle broad-leaved mixed forest	76.34	83.38	65.86	65.97	0.11	86.26	79.07	–7.19	0.03
黄花落叶松林 *Larix olgensis* forest	56.94	57.58	24.97	23.52	–1.45	43.85	40.81	–3.04	–0.51
杨树林 *Populus* forest	47.98	52.03	16.41	18.31	1.90	34.21	35.15	0.94	0.75
针叶混交林 Needle mixed forest	24.95	24.95	23.76	21.16	–2.60	95.23	84.79	–10.44	–2.08
杂木林 Undesirable tree forest	15.78	22.18	4.09	6.64	2.55	25.86	29.95	4.09	2.60
樟子松林 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest	12.79	11.52	5.72	3.68	–2.04	47.38	34.57	–12.81	–3.39
白桦林 *Betula platyphylla* forest	11.94	11.30	6.11	6.07	–0.04	51.12	53.71	2.59	–0.07
胡桃楸林 *Juglans mandshurica* forest	7.89	13.01	3.50	6.81	3.31	44.47	52.37	7.90	6.04
椴树林 *Tilia* forest	5.97	8.10	4.73	6.98	2.25	79.23	86.17	6.94	6.21
榆树林 *Ulmus* forest	5.33	3.63	2.10	1.55	–0.55	39.26	42.86	3.60	–2.55
云杉林 *Picea* forest	4.48	5.12	5.48	3.85	–1.63	122.28	75.30	–46.98	–6.70
红松林 *Pinus koraiensis* forest	4.05	6.40	3.90	4.77	0.87	96.14	74.49	–21.65	3.19
硕桦林 *Betula costata* forest	1.92	2.77	1.57	2.01	0.44	81.27	72.64	–8.63	3.62
水曲柳林 *Fraxinus mandshurica* forest	1.49	1.07	0.60	0.67	0.07	40.27	62.43	22.16	1.13
臭冷杉林 *Abies nephrolepis* forest	0.85	1.07	0.78	0.90	0.12	91.30	84.17	–7.13	2.44
黄檗林 *Phellodendron amurense* forest	0.00	0.21	0.00	0.01	0.01	0.00	4.51	4.51	1.59
总计 Total	729.73	758.09	471.29	505.76	34.47	64.58	66.68	2.10	0.92

doi: 10.17521/cjpe.2015.0192

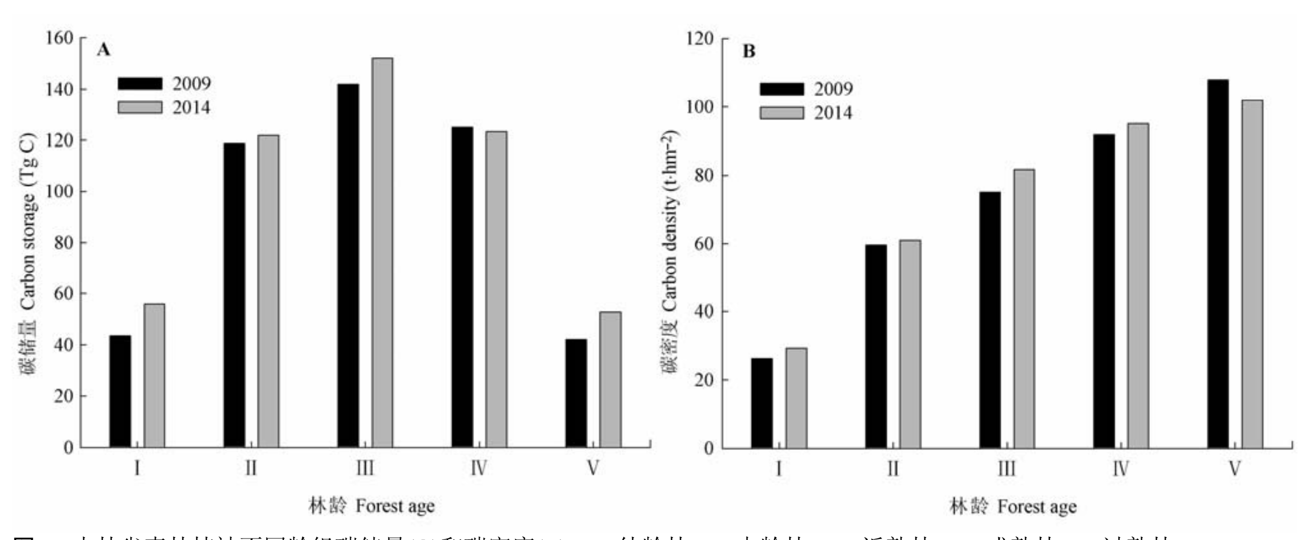


图1 吉林省森林植被不同龄组碳储量(**A**)和碳密度(**B**)。I, 幼龄林; II, 中龄林; III, 近熟林; IV, 成熟林; V, 过熟林。
Fig. 1 Carbon storage (**A**) and density (**B**) of forest vegetation in different age classes in Jilin Province. I, young forest; II, middle-aged forest; III, near mature forest; IV, mature forest; V, over mature forest.

最高, 分别为17.45 Tg C和13.69 Tg C, 合计占全省碳增量的90.34%。其中, 蒙古栎林的碳密度由2009年的61.19 $t·hm^{-2}$增加至2014年的78.15 $t·hm^{-2}$, 与2009年碳密度相比增加了27.72%; 虽然阔叶混交林的碳密度仅增长了4.98%, 但由于其面积比例最大, 碳增量仍较高。不同林分类型的固碳速率以椴树林和胡桃楸林相对较高, 在6 $t·hm^{-2}·a^{-1}$左右; 其次为硕桦(*Betula costata*)林、蒙古栎林、红松林、杂木林和臭冷杉林, 固碳速率为2.44–3.62 $t·hm^{-2}·a^{-1}$; 而针叶混交林、樟子松林、云杉林、黄花落叶松林和白桦林的碳储量和固碳速率呈负增长, 这归因于其林分面积的减小或林分质量的降低。

吉林省森林植被各龄组的面积组成以中龄林(199.81 × 10^4 hm^2)、幼龄林(191.07 × 10^4 hm^2)和近熟林(185.95 × 10^4 hm^2)为主, 合计占全省森林面积的76.09%, 成熟林和过熟林面积相对较小, 分别占17.10%和6.81% (2014年清查数据统计结果)。2009年和2014年森林植被碳储量均以近熟林最高, 分别为141.94 Tg C和151.92 Tg C; 其次为成熟林(125.03 Tg C和123.20 Tg C)和中龄林(118.59 Tg C和121.82 Tg C); 幼龄林(43.59 Tg C和55.90 Tg C)和过熟林(42.13 Tg C和52.63 Tg C)较小, 均不足同期近熟林的40%。两期森林植被的碳密度随林龄的增大呈明显的增加变化, 极值分别为81.72和72.72, 过熟林的碳密度为同期幼龄林的3.11倍和2.49倍(图1), 表明随着吉林省森林植被的不断发育, 植被碳库增长潜力增大。

从两期植被碳增量的龄组组成(图2)来看, 幼龄林和过熟林增长较大, 分别为12.31 Tg C和10.50 Tg C, 合计占总碳增量的66.17%; 其次为近熟林(9.98 Tg C); 中龄林的增量较小(3.23 Tg C); 而成熟林表现为负增长(–1.84 Tg C)。碳密度的增长以近熟林(6.74 $t·hm^{-2}$)最高; 其次为成熟林(3.26 $t·hm^{-2}$)、幼龄林(3.02 $t·hm^{-2}$); 再次为中龄林(1.36 $t·hm^{-2}$); 过熟林表现为下降(–5.98 $t·hm^{-2}$)。而各龄组的固碳速率却以过熟林最高(4.51 $t·hm^{-2}·a^{-1}$); 其次为幼龄林(1.36 $t·hm^{-2}·a^{-1}$)和近熟林(1.07 $t·hm^{-2}·a^{-1}$); 而中龄林相对较小(0.32 $t·hm^{-2}·a^{-1}$), 成熟林的固碳速率为负值(–0.28 $t·hm^{-2}·a^{-1}$)。

结合2009年和2014年两期清查资料各龄组的面积数据(图2)来看, 林分面积的增减是引起幼龄林和过熟林碳储量增长和成熟林碳储量降低的主要因素。其中, 幼龄林和过熟林面积分别增加了24.95 × 10^4 hm^2和12.58 × 10^4 hm^2, 较2009年分别增长了15.02%和32.24%; 而成熟林面积却减少了6.61 × 10^4 hm^2, 减少比例4.85%。虽然近熟林的面积有3.41 × 10^4 hm^2的减少, 但减少比例仅为1.80%, 其碳储量的增加则主要源于林分碳密度的增长; 而中龄林的面积和碳密度均有不同程度的增加, 但增加比例均较低, 碳增量较小。

从各龄组碳库变化的林分组成(图2)来看, 黄花落叶松林幼龄林和针阔混交林幼龄林是幼龄林碳增长的主体, 合计占幼龄林碳增量的86.43%; 过熟林和近熟林的碳增量则主要源于蒙古栎林和阔叶混交

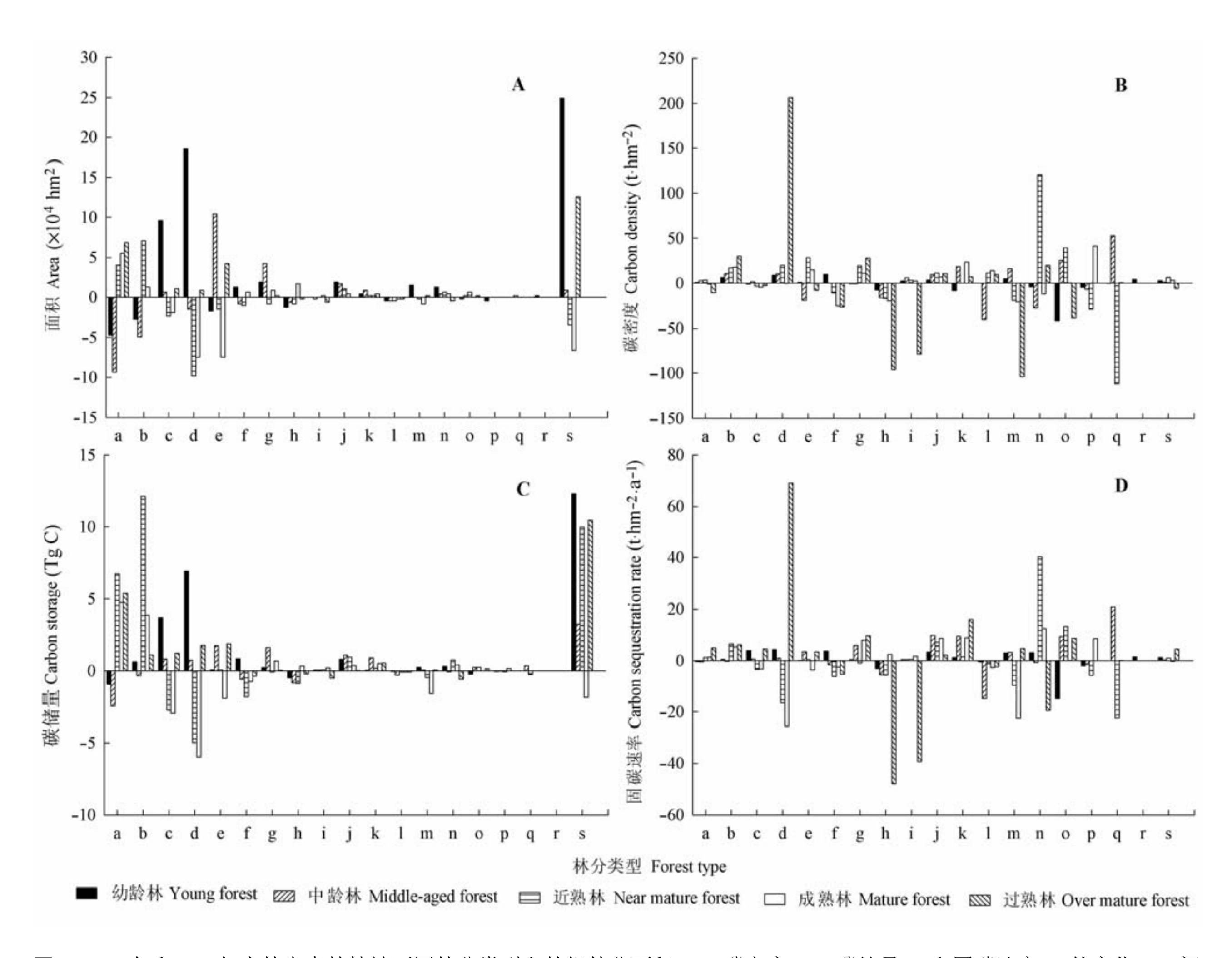


图2　2009年和2014年吉林省森林植被不同林分类型和龄组林分面积(**A**)、碳密度(**B**)、碳储量(**C**)和固碳速率(**D**)的变化。a, 阔叶混交林; b, 蒙古栎林; c, 针阔混交林; d, 黄花落叶松林; e, 杨树林; f, 针叶混交林; g, 杂木林; h, 樟子松林; i, 白桦林; j, 胡桃楸林; k, 椴树林; l, 榆树林; m, 云杉林; n, 红松林; o, 硕桦林; p, 水曲柳林; q, 臭冷杉林; r, 黄檗林; s, 总计。

Fig. 2　Changes of forest area (**A**), carbon density (**B**), carbon storage (**C**), and carbon sequestration rate (**D**) of different forest types and age classes in Jilin Province from 2009 to 2014. a, broadleaf mixed forest; b, *Quercus mongolica* forest; c, needle broad-leaved mixed forest; d, *Larix olgensis* forest; e, *Populus* forest; f, needle mixed forest; g, undesirable tree forest; h, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest; i, *Betula platyphylla* forest; j, *Juglans mandshurica* forest; k, *Tilia* forest; l, *Ulmus* forest; m, *Picea* forest; n, *Pinus koraiensis* forest; o, *Betula costata* forest; p, *Fraxinus mandshurica* forest; q, *Abies nephrolepis* forest; r, *Phellodendron amurense* forest; s, total.

林的增长; 成熟林碳储量降低的原因主要为黄花落叶松林、杨树林和针阔混交林面积大幅减少而引起的碳储量下降; 而各林分类型的中龄林面积和碳密度变幅均较小, 并未表现出明显的林分增值主体。此外, 导致落叶松过熟林和红松近熟林以及樟子松过熟林和白桦近熟林等具有较高或较低碳密度和固碳速率的原因则是林分龄组晋级和采伐所引起的该龄组林分的增加或消失。

2.3　固碳现状与速率的市/区格局

通过对两期森林清查数据中60个市/区森林植被碳储量、碳密度、碳增量以及固碳速率的分别统计, 利用AcrGIS软件获得了吉林省森林植被碳库现状与变化的空间分布状况, 结果见图3至图5。

两期森林植被碳储量分布均以吉林省东北部的汪清县和中东部的安图县、敦化市和抚松县较高, 碳储量在40 Tg C以上; 其次为珲春市、和龙市、蛟河市和桦甸市, 碳储量在30 Tg C左右; 临江市、长白县、靖宇县等地次之, 均有10 Tg C以上的碳储量; 而西部地区的镇赉县、洮北区、洮南市、大安市、通榆县等20余个市/区的碳储量较小, 不足1 Tg C; 碳储量的空间分布整体表现出自东向西明显降低的变化(图3)。森林植被碳密度以吉林省中东部的安图

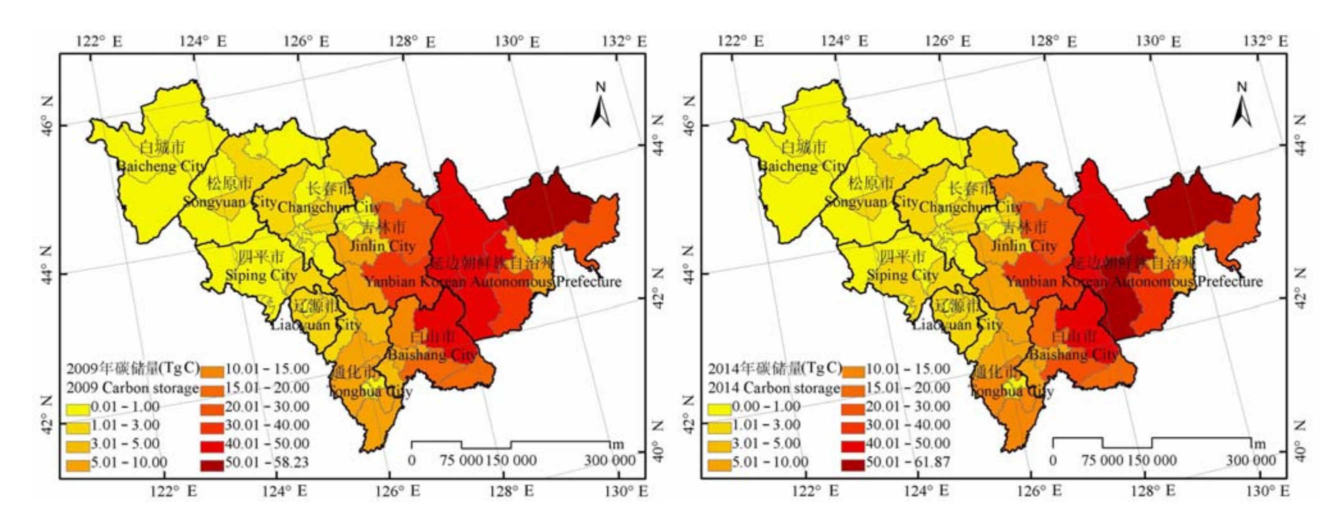


图3 吉林省森林植被碳储量的分布。
Fig. 3 Distribution of forest vegetation carbon storage in Jilin Province.

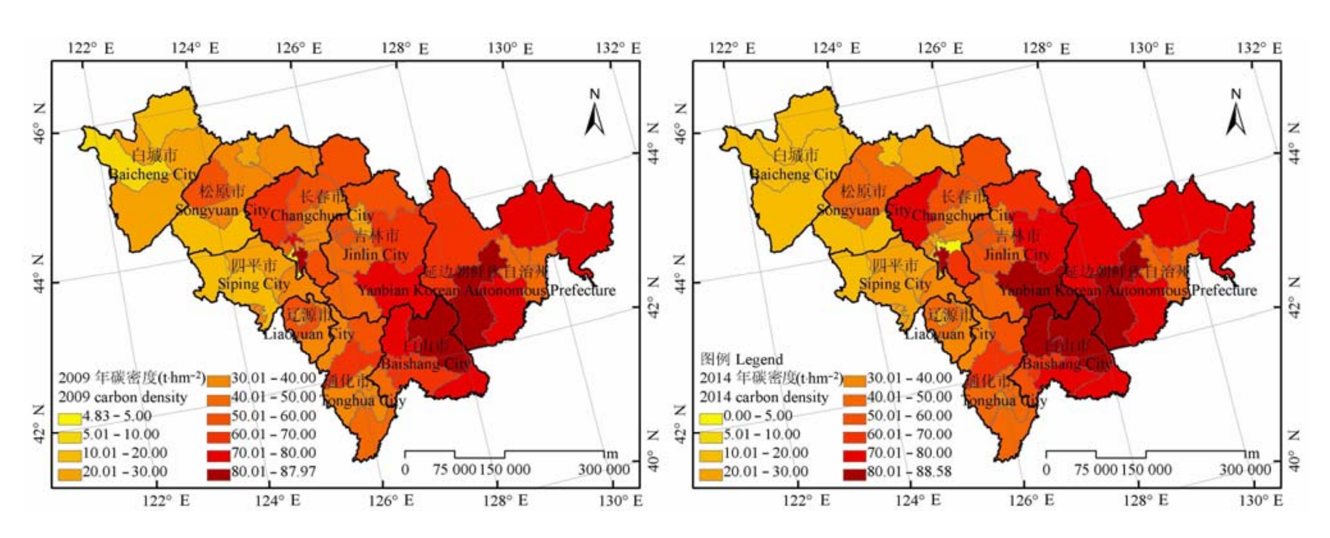


图4 吉林省森林植被碳密度的分布。
Fig. 4 Distribution of forest vegetation carbon density in Jilin Province.

县、抚松县、南关区、靖宇县和桦甸市较高, 2014年的统计结果均在80 Tg C以上; 其次为东北部的汪清县、珲春市、敦化市、蛟河市等地; 西部地区的镇赉县、洮北区、洮南市、大安市、通榆县等市/区的碳密度不足20 t·hm^{-2}。碳密度的空间分布整体也呈现出自东向西的递减变化, 以长白山区相对较高, 西部平原区较低(图4)。

受气候、地貌以及人口等因素影响, 吉林省森林资源集中分布于东部山区和中东部低山丘陵区, 林分以天然林为主, 森林覆盖率大, 且林分质量高。东部的汪清县、敦化市、安图县、抚松县、和龙市、桦甸市、蛟河市和珲春市8市/区的森林面积介于34–81 × 10^4 hm^{2}之间, 蓄积量均超出了5 000 × 10^4 m^3, 占全省森林面积和蓄积的55%和65%左右; 而西部平原区作为本省的主要农业产区, 长期的人为活动影响致使众多原生森被破坏殆尽, 已被次生植被或人工林所替代, 加之西部地区的降水量明显减少, 森林生产力低。其中, 松原地区和白城地区的9个市/区合计森林面积不足全省森林面积的4%, 蓄积不足全省森林蓄积量的1.5%。

各市/区森林植被碳增量以汪清县最高(3.64 Tg C); 其次为靖宇县(2.99 Tg C)、敦化市(2.90 Tg C)、珲春市(2.79 Tg C)、桦甸市(2.75 Tg C)和蛟河市(2.58 Tg C); 再次为临江市(2.46 Tg C)、通化县(2.16 Tg C)和安图县(2.03 Tg C): 以上9个市/区合计碳增量24.31 Tg C, 占全省碳增量的71.12%。这取决于上述

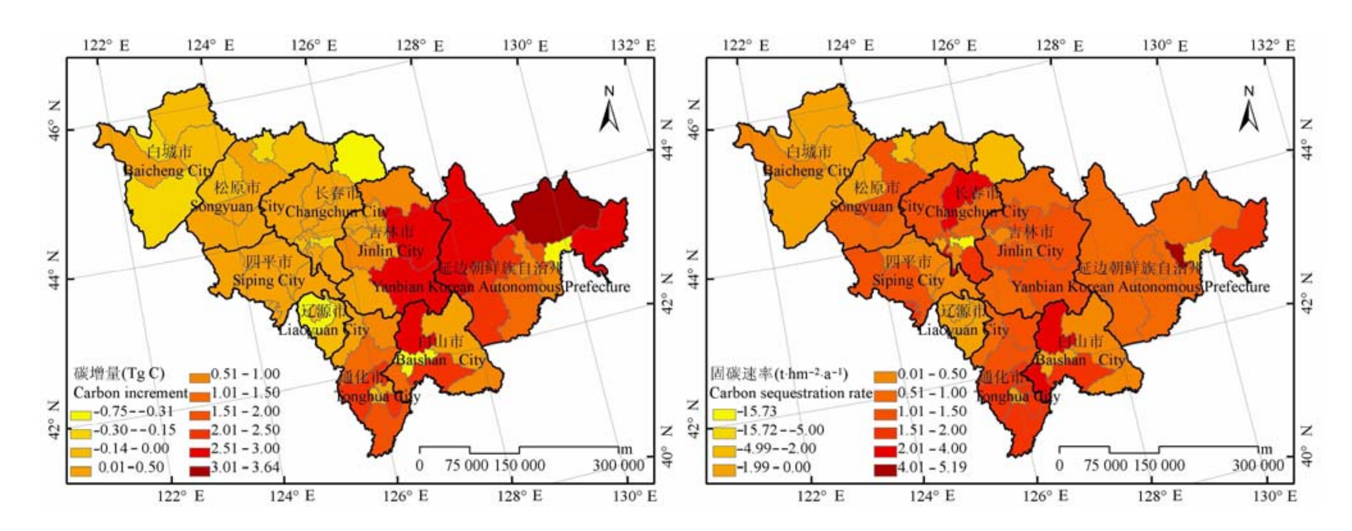


图5　森林植被碳增量与固碳速率的分布。
Fig. 5　Distribution of carbon increment and carbon sequestration rate of forest vegetation in Jilin Province.

市/区森林面积的增加(0.63–2.35 × 10^4 hm^2)、碳密度的增长(3.30–5.66 t·hm^{-2})和森林面积基数。舒兰市、辉南县和永吉县等28个市/区的碳增量较小, 不足1 Tg C, 占全省各市/区数目的47%; 榆树市、西安区、东辽县、宁江区、洮北区等18个市/区的碳增量为负, 占全省市/区数目的30%。碳增量的空间分布整体以东北、中东部和南部相对较高, 西部较低(图5)。

森林植被固碳速率整体以吉林省南部的通化和白山地区相对较高; 其次为中部的长春地区、吉林地区和延边地区东部; 而在西部的白城地区和松原地区等地呈负增长。固碳速率的最大值出现在2014年的延吉市, 达5.19 t·hm^{-2}·a^{-1}, 其2014年的森林面积较2009年增加了24%, 碳密度也有15.79 t·hm^{-2}的增长; 其次为德惠市、靖宇县、浑江区、朝阳区、铁东和铁西等地的24个市/区, 固碳速率均超过1 t·hm^{-2}·a^{-1}; 而碳储量较高的汪清县、敦化市、安图县、和龙以及中西部的舒兰市、梅河口市等18个市/区, 固碳速率不足1 t·hm^{-2}·a^{-1}; 二道区、宁江区、榆树市等17个市/区的固碳速率为负, 占全省市/区数目的28% (图5)。

3　结论和讨论

3.1　林下植被生物量与植被含碳率

林下植被在森林生态系统的稳定性、生产力以及养分循环等方面具有重要的作用(Chastain *et al*., 2006; Gilliam, 2007; 王瑞华等, 2014), 特别是在发育较好的中幼林林下植被生物量往往占有较大比例(Schroeder *et al*., 1997; 陈遐林, 2003; 杨昆和管东生, 2007; 杨超等, 2011)。然而受林分类型, 林分的发育、演替以及立地和环境等诸多条件影响, 林下植被生物量存在较大的差异(Yamamoto *et al*., 1995; Taylor *et al*., 2004; Gilliam, 2007)。在区域尺度的碳储量估算中, 林下植被生物量也常因其比例小、变化幅度大等原因而被忽略。本研究通过对区域调查样地的林下灌木和草本植物收获法实测以及幼树生物量的模型统计, 得出不同林分类型的林下植被生物量介于0.04–4.45 t·hm^{-2}之间, 灌木植物略高于草本植物和幼树, 虽整体不足乔木层生物量的3%, 但在不同林分和同类林分中却存在较大的差异。其中, 幼树生物量在白桦林、针阔混交林和针叶混交林较高, 在1 t·hm^{-2}左右, 在人工杨树林缺失。在同类林分内的变异以幼树最高, 尤其是人工黄花落叶松林、人工樟子松林、针叶混交林和蒙古栎林, 均超过了100%; 草本和灌木植物的生物量变异相对较小, 分别在50%和35%以下。

国内外在研究区域和国家尺度的森林生态系统碳储量中, 大多采用0.50或0.45作为所有森林类型的平均含碳率(周玉荣等, 2000; Fang *et al*., 2001; 王效科等, 2001; Baccini *et al*., 2012); IPCC (2006)也提出森林生物量的含碳率为0.47或0.50, 林下植被的含碳率为0.45。但事实上, 植被的含碳率会因种类(Lamlom & Savidge, 2003; 田勇燕等, 2011)、器官(胡青等, 2012; 王金亮等, 2012; 于颖等, 2012)、发育阶段(王金亮等, 2012)、分布区域(田勇燕等, 2011; 于颖等, 2012)等差异而不同。本研究得出乔木含碳率高于灌木和草本, 介于45.80%–52.97%之间, 整

体表现为针叶林高于阔叶林；灌木含碳率介于39.79%–47.25%之间，草本植物在40%左右，但二者并不呈现规律性的林分差异。乔木含碳率的变异相对较小，不足3%；而灌木和草本植物较大，这应与其物种组成的相对复杂有关。根据2009和2014年两期植被生物量和碳储量的计算结果得出，吉林省森林植被碳转换系数以0.47或0.48更为准确，若以0.50或0.45作为植被的碳转换系数会造成±5.26%的偏差。

3.2 吉林省森林植被碳库状况与潜力

2009至2014年期间，吉林省森林面积累计增长了28.36 × 10^4 hm^2，植被碳储量由2009年的471.29 Tg C增至2014年的505.76 Tg C，碳密度也由64.58 t·hm^{-2}增加到66.68 t·hm^{-2}，累计碳增量34.47 Tg C，年均6.89 Tg C·a^{-1}，平均固碳速率0.92 t·hm^{-2}·a^{-1}。植被碳储量的研究结果与王新闯等(2011)(444.35 Tg C)和范春楠(2014)(398.12 Tg C)利用2006年清查数据获得的结果相比略高，介于李海奎等(2012)应用IPCC固定扩展因子法(506.48 Tg C)、IPCC可变扩展因子法(326.10 Tg C)、转换因子连续函数法(469.75.48 Tg C)和加权生物量回归法(542.96 Tg C)所获得的结果(碳储量以0.475为转换系数的生物量换算结果)之间。若按照周玉荣等(2000)与李克让等(2003)估算的全国森林植被碳储量为6.2 Pg C和4.29 Pg C的结果计算，吉林省的植被碳储量占全国植被碳储量的8.16%或11.79%，然而吉林省的森林面积仅为全国森林面积的4.2%，说明吉林省森林植被是全国森林植被碳库的重要组成部分。

本研究获得的吉林省植被碳密度平均值在我国的38种森林类型植被碳密度(6.47–118.14 t·hm^{-2})范围(王效科等, 2001)之内，高出我国森林植被碳密度平均水平(41.32 t·hm^{-2}) (赵敏和周广胜，2004) 61.4%，是东北地区的黑龙江省(33.44 t·hm^{-2}) (焦燕和胡海清，2005)的2倍，辽宁省(25.08 t·hm^{-2}) (甄伟等, 2014)的2.7倍。植被平均固碳速率介于小兴安岭7种典型林分0.4–2.8 t·hm^{-2}·a^{-1} (胡海清等，2015)之间，与辽宁省(0.61 t·hm^{-2}·a^{-1}，50 a模拟结果的单位面积最大平均固碳速率) (甄伟等, 2014)相比较高。可见吉林省的森林植被不仅维持着较高的碳库水平，而且具有较强的碳汇功能。若以本研究结果获得的面积增长和固碳速率计算，到2020年吉林省的碳储量将达到548.58 Tg C，在我国乃至全球碳循环中均占有重要的地位。

3.3 吉林省森林植被持续碳增汇的思路

吉林省森林植被碳库的林分组成以阔叶混交林、针阔混交林和蒙古栎林为主体，其面积与碳储量合计分别占全省的71%和78%左右；碳密度介于61.19–86.26 t·hm^{-2}之间，但与吉林省2009年云冷杉林(122.28 t·hm^{-2})以及红松林、针叶混交林和臭冷杉林(>90 t·hm^{-2})相比，明显偏低；仅为区域地带性植被阔叶红松原始林((152.87 ± 20.90) t·hm^{-2})的1/2左右(齐麟等, 2013)。因此，如何通过科学经营实现三类林分碳密度的增长，应是实现吉林省森林植被碳增汇的重要任务之一。早在20世纪80年代，陈大珂等(1984)即针对东北地区由过度干扰所引起的阔叶红松林锐减和退化问题，提出了“栽针保阔经营体系”。牟长城等(2014)的研究结果表明：冠下栽植红松33年的林分已初步形成了异龄复层针阔混交林，植被碳密度达95.33 t·hm^{-2}；不同强度的透光抚育虽然明显提高了红松的碳密度，但是显著降低了林分的碳储量，因此从维持植被碳库角度考虑，采取中低强度择伐或小范围上层全透光方式比较适宜。迄今为止在东北林区的次生阔叶林下，通过营造红松形成的“栽针保阔”红松林虽有近100 × 10^4 hm^2，但其恢复效果以及科学经营等问题还尚需较长时间尺度的数据验证和一定的理论支持(牟长城等, 2014)。

从吉林省森林植被的龄组组成来看，以中龄林、幼龄林和近熟林为主的林分占全省森林面积的76.09%，成、过熟森林面积小，龄组的面积组成呈进展型。碳储量以近熟林、成熟林和中龄林较高，幼龄林和过熟林较小；随着林龄的增长，植被的碳密度增加明显。随着区域森林的不断发育和经营活动，5年间幼龄林的面积累计增长了24.95 × 10^4 hm^2，然而其碳储量却不足同期近熟林碳储量的40%，碳密度与过熟林相比相差约80 t·hm^{-2}，可见源于区域森林植被龄组发育的固碳潜力也十分巨大。

相关研究表明，生长旺盛的中幼龄林的植被具有较强的固碳能力，而成熟林植被的新增碳量几乎为0 (Dixon *et al*., 1994; Zhou *et al*., 2006)。吉林省森林植被碳增量为幼龄林>过熟林>近熟林>中龄林，成熟林为负增长；碳密度的增长为近熟林>成熟林>幼龄林>中龄林，过熟林表现为下降；而各龄组的固碳速率却为过熟林>幼龄林>近熟林>中龄林，成熟林为负增长，这除受植被发育生物量增长影响外，还与龄组晋级和人为经营所引起的森林面积增减关

系密切。其中, 幼龄林具有较高的固碳速率和碳增量主要得益于人工造林面积的增长; 但幼龄林和中龄林较低的碳密度增长, 尚需要科学的调整, 以实现区域森林植被持续碳汇能力的增长。

从吉林省森林植被碳库的空间分布来看, 碳储量和碳密度的分布整体表现为自东向西明显降低的变化, 以吉林省东北部的汪清县和珲春市以及中东部的安图县、抚松县、桦甸市等地相对较高, 是吉林省森林植被碳库的主体; 而在西部的镇赉县、洮北区、洮南市、大安市等地的碳储量不足1 Tg C, 碳密度低于20 t·hm^{-2}。吉林省植被碳库的空间分布, 一方面源于因气候、地貌等因素引起的森林在降雨充沛的东部山区和中东部低山丘陵区的集中分布, 另一方面则由于西部平原区的人口密集和长期的农业生产, 致使众多原生植被破坏殆尽和森林生产力低下。

植被碳增量和固碳速率的空间分布状况并非与碳库分布状况相一致。碳增量整体以东北的汪清县、中东部的敦化市和蛟河市等地以及南部的通化县、临江市和靖宇县相对较高, 榆树市、洮北区等18个市/区的碳增量为负增长; 固碳速率则整体以吉林省南部的通化地区和白山地区相对较高, 在西部的白城地区和松原地区等地呈负增长。因此, 吉林省应积极加强东部山区和中部低山丘陵的森林植被碳库的保护与管理, 特别是维持南部和中部地区的持续增长和提高东部地区的固碳速率; 增加西部平原地区的森林面积, 并调整和改善现有林的结构和质量, 以实现西部地区森林碳汇增长。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050201-1)和科技部基础性工作专项重点项目(2007FY110400)。

致谢 感谢吉林省森工局、林业局以及北华大学林学院研究生在野外调查工作中给予的帮助。

参考文献

Baccini A, Goetz SJ, Walker WS, Laporte NT, Sun M, Sulla-Menashe D, Hackler J, Beck PSA, Dubayah R, Friedl MA, Samanta S, Houghton RA (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change,* 2, 182–185.

Chastain Jr RA, Currie WS, Townsend PA (2006). Carbon sequestration and nutrient cycling implications of the evergreen understory layer in Appalachian forests. *Forest Ecology and Management,* 231, 63–77.

Chen CG, Zhu JF (1989). *The Manual for Main Tree Biomass in Northeast China.* China Forestry Publishing House, Beijing. 158–173. (in Chinese) [陈传国, 朱俊凤(1989). 东北主要林木生物量手册. 中国林业出版社, 北京. 158–173.]

Chen DK, Zhou XF, Ding BY, Hu ZC, Zhu N, Wang YH, Zhao HX, Ju YG, Jin YY (1984). Research on natural secondary forest in Heilongjing Province—The Management approach of planting conifers and conserving deciduous trees. *Journal of North-Eastern Forestry Institute,* 12(4), 1–12. (in Chinese with English abstract) [陈大珂, 周晓峰, 丁宝永, 胡正昌, 祝宁, 王义弘, 赵惠勋, 鞠永贵, 金永岩 (1984). 黑龙江省天然次生林研究(I)——栽针保阔的经营途径. 东北林学院学报, 12(4), 1–12.]

Chen XL (2003). *Researches on Carbon Sequestration Functions of Main Forest Types in Northern China.* PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. 84–85. (in Chinese with English abstract) [陈遐林 (2003). 华北主要森林类型的碳汇功能研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京. 84–85.]

Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science,* 263, 185–190.

Fan CN (2014). *The Carbon Distribution Characteristic and Storage of Forest Vegetation in Jilin Province.* PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. 27–33. (in Chinese with English abstract) [范春楠 (2014). 吉林省森林植被碳估算及其分布特征. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨. 27–33.]

Fan CN, Pang SJ, Zheng JP, Li B, Guo ZL (2013). Biomass estimating models of saplings for 14 species in Changbaishan Mountains, Northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University,* 35(2), 1–9. (in Chinese with English abstract) [范春楠, 庞圣江, 郑金萍, 李兵, 郭忠玲 (2013). 长白山林区14种幼树生物量估测模型. 北京林业大学学报, 35(2), 1–9.]

Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science,* 292, 2320–2322.

Gilliam FS (2007). The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems. *Bioscience,* 57, 845–858.

Hu HQ, Luo BZ, Wei SJ, Wei SW, Sun L, Luo SS, Ma HB (2015). Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology,* 39, 140–158. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 魏书威, 孙龙, 罗斯生, 马洪斌 (2015). 小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力. 植物生态学报, 39, 140–158.]

Hu Q, Wang SL, Chen LC, Zhang WD, Gong C (2012). Biomass and carbon density of main forest ecosystems in Hubei Province. *Chinese Journal of Ecology,* 31, 1626–1632. (in Chinese with English abstract) [胡青, 汪思龙, 陈龙池, 张伟东, 宫超 (2012). 湖北省主要森林类型生态系统生物量与碳密度比较. 生态学杂志, 31, 1626–1632.]

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006). Agriculture, forestry and other land use. In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K eds. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan.

Jia WW, Jiang SW, Li FR (2008). Biomass of single tree of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Eastern Heilongjiang. *Liaoning Forestry Science and Technology,* (3), 5–9. (in Chinese with English abstract) [贾炜玮, 姜生伟, 李凤日 (2008). 黑龙江东部地区樟子松人工林单木生物量研究. 辽宁林业科技, (3), 5–9.]

Jiao Y, Hu HQ (2005). Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 16, 2248–2252. (in Chinese with English abstract) [焦燕, 胡海清 (2005). 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化. 应用生态学报, 16, 2248–2252.]

Keeling CD, Chin JFS, Whorf TP (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO_2 measurements. *Nature,* 382, 146–149.

Lamlom SH, Savidge RA (2003). A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy,* 25, 381–388.

Li HK, Zhao PX, Lei YC, Zeng WS (2012). Comparison on estimation of wood biomass using forest inventory data. *Scientia Silvae Sinicae,* 48(5), 44–52. (in Chinese with English abstract) [李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 曾伟生 (2012). 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较. 林业科学, 48(5), 44–52.]

Li KR, Wang SQ, Cao MK (2004). Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China* (*Series D*), 33(1), 72–80. (in Chinese) [李克让, 王绍强, 曹明奎 (2003). 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学(D辑), 33(1), 72–80.]

Liu GH, Fu BJ, Fang JY (2000). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica,* 20, 733–740. (in Chinese with English abstract) [刘国华, 傅伯杰, 方精云 (2000). 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 20, 733–740.]

Luan JW, Liu SR, Zhu XL, Wang JX (2011). Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China. *Plant and Soil,* 347, 243–253.

Mu CC, Zhuang C, Han YR, Zhang XL, Tong JQ, Cheng JY, Cao WL (2014). Effect of liberation cutting on the vegetation carbon storage of Korean pine forests by planting conifer and reserving broad-leaved tree in Changbai Mountains of China. *Bulletin of Botanical Research,* 34, 529–536. (in Chinese with English abstract) [牟长城, 庄宸, 韩阳瑞, 张晓亮, 佟静秋, 程家友, 曹万亮 (2014). 透光抚育对长白山"栽针保阔"红松林植被碳储量影响. 植物研究, 34,529–536.]

Nowak DJ, Crane DE (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution,* 116, 381–389.

Qi L, Yu DP, Zhou WM, Zhou L, Zhao FA, Wang CH, Dai LM (2013). Impact of logging on carbon density of broad-leaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains. *Acta Ecologica Sinica,* 33, 3065–3073. (in Chinese with English abstract) [齐麟, 于大炮, 周旺明, 周莉, 赵福安, 王长海, 代力民 (2013). 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响. 生态学报, 33, 3065–3073.]

Schlesinger WH (1977). Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics,* 8, 51–81.

Schroeder P, Brown S, Mo J, Birdsey R, Cleszewski C (1997). Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest Science,* 43, 424–434.

Tang FD, Han SJ, Zhang JH (2009). Carbon dynamics of broad-leaved Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains and its responses to climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 20, 1285–1292. (in Chinese with English abstract) [唐凤德, 韩士杰, 张军辉 (2009). 长白山阔叶红松林生态系统碳动态及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 20, 1285–1292.]

Tans PP, Fung IY, Takahashi T (1990). Observational contrains on the global atmospheric CO_2 budget. *Science,* 247, 1431–1438.

Taylor AH, Huang JY, Zhou SQ (2004). Canopy tree development and undergrowth bamboo dynamics in old-growth *Abies-Betula* forests in southwestern China: A 12-year study. *Forest Ecology and Management,* 200, 347–360.

Tian YY, Qin F, Yan H, Guo WH, Guan QW (2011). Carbon content rate in the common woody plants of China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences,* 39, 16166–16169. (in Chinese with English abstract) [田勇燕, 秦飞, 言华, 郭伟红, 关庆伟 (2011). 我国常见木本植物的含碳率. 安徽农业科学, 39, 16166–16169.]

Wang CK (2006). Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management,* 222, 9–16.

Wang JL, Wang XH, Yue CR, Cheng F, Xu TS, Cheng PF, Wang XM, Gao Y (2012). Carbon content rate in dominant species of four forest types in Shangri-la, northwest Yunnan Province. *Ecology and Environment Sciences,* 21, 613–619. (in Chinese with English abstract) [王金亮, 王

小花, 岳彩荣, 程峰, 徐天蜀, 程鹏飞, 王雪梅, 高雁 (2012). 滇西北香格里拉森林4个建群种的含碳率. 生态环境学报, 21, 613–619.]

Wang RH, Ge XM, Tang LZ (2014). A review of diversity, biomass and nutrient effect of understory vegetation. *World Forestry Research,* 27, 43–48. (in Chinese with English abstract) [王瑞华, 葛晓敏, 唐罗忠 (2014). 林下植被多样性、生物量及养分作用研究进展. 世界林业研究, 27, 43–48.]

Wang SQ, Liu JY, Yu GR (2003). Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon storage in China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 14, 797–802. (in Chinese with English abstract) [王绍强, 刘纪远, 于贵瑞 (2003). 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析. 应用生态学报, 14, 797–802.]

Wang XC, Qi G, Yu DP, Zhou L, Dai LM (2011). Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 22, 2013–2020. (in Chinese with English abstract) [王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民 (2011). 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 22, 2013–2020.]

Wang XK, Bai YY, Ouyang ZY, Miao H (2002). Missing sink in global carbon cycle and its causes. *Acta Ecologica Sinica,* 22, 94–103. (in Chinese with English abstract) [王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 苗鸿 (2002). 全球碳循环中的失汇及其形成原因. 生态学报, 22, 94–103.]

Wang XK, Feng ZW, Ouyang ZY (2001). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 12, 13–16. (in Chinese with English abstract) [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云 (2001). 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 12, 13–16.]

Wani AA, Joshi PK, Singh O, Bhat JA (2014). Estimating soil carbon storage and mitigation under temperate coniferous forests in the southern region of Kashmir Himalayas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* 19, 1179–1194.

Xie XL, Sun B, Zhou HZ, Li ZP, Li AB (2004). Organic carbon density and storage in soils of china and spatial analysis. *Acta Pedologica Sinica,* 41, 35–43. (in Chinese with English abstract) [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波 (2004). 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 41, 35–43.]

Yamamoto SI, Nishimura N, Matsui K (1995). Natural disturbance and tree species coexistence in an old-growth beech-dwarf bamboo forest, southwestern Japan. *Journal of Vegetation Science,* 6, 875–886.

Yang C, Tian DL, Hu YL, Yan WD, Fang X, Liang XC (2011). Dynamics of understory vegetation biomass in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations. *Acta Ecologica Sinica,* 31, 2737–2447. (in Chinese with English abstract) [杨超, 田大伦, 胡曰利, 闫文德, 方晰, 梁小翠 (2011). 连栽杉木林林下植被生物量动态格局. 生态学报, 31, 2737–2447.]

Yang K, Guan DS (2007). Selection of gaining quadrat for harvesting the undergrowth vegetation and its biomass estimation modeling in forest. *Acta Ecologica Sinica,* 27, 705–714. (in Chinese with English abstract) [杨昆, 管东生 (2007). 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型. 生态学报, 27, 705–714.]

Yu Y, Fan WY, Li MZ (2012). Forest carbon rates at different scales in Northeast China forest area. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 23, 341–346. (in Chinese with English abstract) [于颖, 范文义, 李明泽 (2012). 东北林区不同尺度森林的含碳率. 应用生态学报, 23, 341–346.]

Zhao M, Zhou GS (2004). Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica,* 24, 50–54. (in Chinese with English abstract) [赵敏, 周广胜 (2004). 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 24, 50–54.]

Zhen W, Huang M, Zhai YL, Chen K, Gong YZ (2014). Variation of forest vegetation carbon storage and carbon sequestration rate in Liaoning Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 25, 1259–1265. (in Chinese with English abstract) [甄伟, 黄玫, 翟印礼, 陈珂, 龚亚珍 (2014). 辽宁省森林植被碳储量和固碳速率变化. 应用生态学报, 25, 1259–1265.]

Zheng ZM, Zhang M, Wen XF, Sun XM, Yu GR, Zhang LM, Han SJ, Wu JB (2009). Contributions of below-canopy CO_2 fluxes to ecosystem carbon budget of a temperate mixed forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica,* 29, 1–8. (in Chinese with English abstract) [郑泽梅, 张弥, 温学发, 孙晓敏, 于贵瑞, 张雷明, 韩士杰, 吴家兵 (2009). 长白山温带混交林林冠下层CO_2通量对生态系统碳收支的贡献. 生态学报, 29, 1–8.]

Zhou GY, Liu SG, Li ZA, Zhang DQ, Tang XL, Zhou CY, Yan JH, Mo JM (2006). Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science,* 314, 1417.

Zhou YR, Yu ZL, Zhao SD (2000). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytoecologica Sinica,* 24, 518–522. (in Chinese with English abstract) [周玉荣, 于振良, 赵士洞 (2000). 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 24, 518–522.]

Zhu B, Wang XP, Fang JY, Piao SL, Shen HH, Zhao SQ, Peng CH (2010). Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt. Changbai, Northeast China. *Journal of Plant Research,* 123, 439–452.

责任编委: 马克平 责任编辑: 王 葳

doi: 10.17521/cjpe.2015.0192